

**Список литературы:** 1. *Макеев В.П., Гриненко Н.И., Павлюк Ю.С.* Статистические задачи динамики упругих конструкций. – М.: Наука, 1984. – 232 с. 2. *Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др.* – М.: Транспорт, 1992. – 440 с. 3. *Статистическая динамика рельсовых экипажей / В.Ф. Ушкалов, Л.М. Резников, С.Ф. Редько* – Киев: Наук. думка, 1982. – 360 с.

*Поступила в редколлегию 18.11.2002*

УДК 621.891

**А.И.БЕРЕЗНЯКОВ**, канд. техн. наук; **Ю.А.ГРАДЫСКИЙ**, Хи ВВС  
**Н.Г.СТАДНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, Хи ВВС

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННОГО МАТЕРИАЛА НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Досліджено вплив температури поверхні осадження і швидкості охолодження наплавляемого в процесі електромагнітного наплавлення матеріалу на втомну міцність і триботехнічні характеристики реставрованої поверхні. Отримано рівняння, що зв'язує виробництво ентропії зі швидкістю охолодження матеріалу. Експериментально встановлено, що термомагнітна обробка матеріалу приводить до поліпшення його структури. Виявлено, що відновлення деталей методом електромагнітного наплавлення приводить до поліпшення структури і триботехнічних властивостей поверхні.

The influence of precipitation surface's temperature and the speed of surfacing cooling in the process of material's electromagnetic building-up on the fatigue durability and tribomechanical characteristics of the restoration surface were examined. The equation connecting the production of entropy with the speed of material cooling was reached. It was established by the way of experiment that materials thermomagnetic machining leads to the improvement of its structure. It is discovered that details restoration by electromagnetic method leads to the improvement of the structure and tribomechanical properties of the surface.

**Введение.** Наиболее актуальной проблемой современного машиностроения является повышение надежности и долговечности деталей машин и механизмов. Решение этой проблемы может быть достигнуто путем применения технологических процессов, обеспечивающих комплексное улучшение физико-механических свойств изделий. К основным эксплуатационным характеристикам, от которых зависят надежность и долговечность, относятся износостойкость, прочность и циклическая долговечность.

Одним из методов повышения надежности и долговечности деталей является поверхностное упрочнение. Формирование упрочненного слоя, протекающие при этом физико-химические процессы, наличие несовершенств строения покрытия во многом определяют механические свойства изделия в целом. На сохранение физических и механических свойств композиции "упрочненный слой-основа" в процессе эксплуатации влияет, прежде всего,

структура как самого упрочненного слоя, так и переходной зоны. Образование структуры упрочненного слоя и переходной зоны во многом зависит от состояния поверхности, на которую наносится покрытие, химического состава упрочняющего материала, метода нанесения и технологических операций, которым подвергается изделие после нанесения покрытия. При выборе материала покрытия, метода его нанесения, финишных технологий, необходимо, чтобы полученное покрытие обеспечивало комплексное улучшение эксплуатационных свойств: например, высокую износостойкость при положительном или нейтральном влиянии на усталостную прочность.

Основная цель данной работы – создание и обоснование метода упрочнения деталей, работающих при одновременном воздействии трения и циклического нагружения. Управление свойствами материала с покрытием достигается путем воздействия на формирование структуры и фазового состава поверхностного и подповерхностного слоев физических и технологических факторов, влияющих на режим получения покрытия.

Одним из способов, позволяющих восстанавливать и упрочнять детали машин и механизмов, является наплавка. В данной работе, в качестве метода улучшения эксплуатационных характеристик, рассматривается электромагнитная наплавка (ЭМН) [1]. Метод позволяет наплавлять любые ферромагнитные порошки для восстановления и упрочнения рабочих органов деталей, подверженных износу и воздействию агрессивных сред.

**Методика эксперимента.** Сущность ЭМН состоит в том, что на вращающуюся в постоянном магнитном поле индукцией  $\sim 0,9$  Тл деталь наносятся тонкодисперсные частицы ферромагнитного порошка, который наплавляется на поверхность детали путем импульсного искрового разряда при напряженности электрического поля  $\sim 10^4$  В/м. В качестве наплавляемого материала использовалась сталь Р6М5. Магнитное и электрическое поля были ориентированы перпендикулярно к поверхности детали. Толщина покрытия составляла 0,3мм, а время его нанесения – 10с. Рентгенографические исследования образцов проводились на установке “ДРОН – 2.0”, испытания на усталостную прочность выполнялись на машине МУИ – 6000, а определение интенсивности изнашивания и коэффициента трения – на машине трения 2070 СМТ – 1.

**Проблематика исследования.** В результате ЭМН на поверхности, находящиеся при температуре, близкой к комнатной, образуется поверхностный слой, характеризующийся сильно дефектной структурой. Этот слой содержит большое количество пор и трещин, легирующие элементы распределены по его объему крайне неравномерно, а его структура весьма неоднородна. По данным рентгеноструктурного анализа, покрытие имеет трехфазную структуру, состоящую из мартенсита (70 %), аустенита и карбидов. Такая структура характеризуется повышенной твердостью, но пониженным (на 15 %) значением усталостной прочности по сравнению с соответствующей величиной для стали 45 без покрытия.

Такое покрытие приводит к повышению износостойкости поверхности при снижении ее усталостной прочности, причем иногда наблюдается отслаивание покрытия под влиянием термических напряжений. Повышение усталостной прочности можно обеспечить путем нагрева поверхности во время ЭМН, однако это приводит к снижению микротвердости, что, в принципе, может неблагоприятно отразиться на его износостойкости. Для определения оптимального технологического режима нанесения покрытия было предпринято исследование реологических и триботехнических свойств напытий, осажденных на поверхность, находящуюся при температуре 250<sup>0</sup>С.

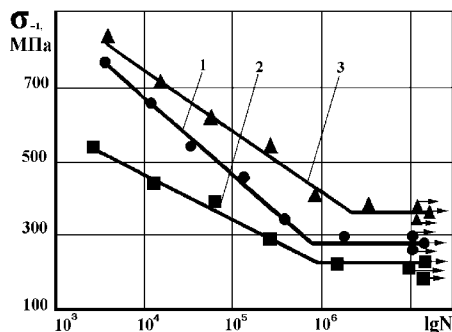


Рис. 1. Кривые усталости образцов из стали 45: 1 – закаленная сталь; 2 – ЭМН при комнатной температуре; 3 – ЭМН при подогреве до 250<sup>0</sup>С.

**Результаты эксперимента и их анализ.** Усталостная прочность закаленной стали 45 в исходном состоянии, а также после наплавки при различных температурах измерялась как функция числа циклов нагружения с амплитудой нагружения 200...800 МПа и частотой нагружения 50 Гц. Результаты эксперимента представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, усталостная прочность закаленной стали 45 понижается при наплавке при комнатной температуре, но повышается при наплавке на подогретую подложку. При этом

твердость слоя, наплавленного на холодную подложку, выше, чем для подогретой подложки. Минимальной твердостью обладает поверхность стали 45 без покрытия.

При охлаждении наплавленного слоя на поверхности массивной детали температура поверхности практически мало отличается от комнатной, вследствие чего в наплавленном материале возникают растягивающие термические напряжения, величина которых

$$\sigma_T = \left( \frac{E}{1-\mu} \right) \alpha \Delta T, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – термический коэффициент расширения;

$E$  – модуль Юнга;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\Delta T$  – разность температур.

Однако при наплавке ферромагнитного материала ситуация осложняется тем, что при охлаждении ниже точки Кюри в нем появляются магнитострикционные напряжения

$$\sigma_\lambda = E\lambda, \quad (2)$$

где  $\lambda$  - величина магнитострикции.

Так как для железа с небольшим количеством примесей  $\lambda < 0$ , магнитострикционные напряжения также являются растягивающими, тогда результирующее напряжение

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_\lambda = E \frac{\alpha \Delta T}{1 - \mu} + \lambda. \quad (3)$$

Таким образом, результирующее напряжение в ферромагнетике с отрицательной магнитострикцией превосходит величину термического напряжения в материалах, для которых  $\lambda \geq 0$ , что создает условия для нарушения монолитности наплавленного покрытия вплоть до его отслоения.

Так как скорость охлаждения наплавленного слоя на не подогретую подложку весьма велика, в нем возникают многочисленные дефекты структуры в виде пор, вакансий, дислокаций, причем скорость деформации ( $\dot{\epsilon}$ ) связана со скоростью охлаждения ( $\dot{T}$ ) соотношением

$$\dot{\epsilon} = \alpha \dot{T}. \quad (4)$$

При пластическом деформировании напряжение ( $\sigma'$ ) связано со скоростью деформации ( $\dot{\epsilon}$ ) соотношением

$$\sigma' = \eta \dot{\epsilon}, \quad (5)$$

где  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения.

Подставляя уравнение (4) в (5), получим

$$\sigma' = \eta \alpha \dot{T}. \quad (6)$$

Произведение тензора диссипативных напряжений на скорость деформации определяет величину диссипативной функции (D), то есть

$$D(\dot{\epsilon}) = \sigma' \dot{\epsilon} = \eta \alpha^2 (\dot{T})^2. \quad (7)$$

Так как производство энтропии ( $p_s$ ) связано с диссипативной функцией соотношением  $p_s = D/T$ , получим

$$P_s = \eta \alpha^2 \frac{(\dot{T})^2}{T}. \quad (8)$$

Таким образом, степень деградации структуры поверхностного наплавленного слоя оказывается пропорциональной квадрату скорости его охлаждения и обратно пропорциональной его температуре.

Уравнение (8) является аналитическим выражением широко известного факта улучшения структуры осажденного слоя при повышении температуры подложки и уменьшении скорости образования слоя.

Однако, охлаждение ферромагнетика в магнитном поле приводит к явлению термомагнитного отжига, который тоже вносит вклад в улучшение структуры наплавленного слоя.

Во-первых, при термомагнитном отжиге происходит существенное

уменьшение величины магнитострикции [2], что приводит к уменьшению результирующего напряжения растяжения в наплавленном слое.

Во-вторых, в соответствии с теорией направленного упорядочения Нееля [3], в процессе термоманнитного отжига происходит упорядочение размещения легирующих и примесных элементов в решетке железа посредством диффузии в магнитном поле. При этом возникает магнитная текстура, создающая направление легкого намагничивания, созданного магнитоупругими напряжениями, так как для материалов с отрицательной магнитострикцией направление легкого намагничивания перпендикулярно направлению, в котором действуют напряжения [2]. Поскольку напряжения растяжения действуют в плоскости подложки, ось легкого намагничивания направлена перпендикулярно к ней, т.е. вдоль поля.

При повышении температуры подложки вследствие диффузии возникает структурно упорядоченный переходной слой, состоящий из перекристаллизованного феррита и легированного аустенита, который локализован между наплавленным материалом и подложкой. Этот слой обеспечивает высокую механическую прочность контакта, которая была низкой для неподогретой подложки, где наблюдалась резкая граница между наплавленным слоем и подложкой. Понижение плотности дислокаций, происходящее при структурном упорядочении, приводит к понижению твердости наплавленного материала.

Перейдем к анализу триботехнических экспериментов. Триботехнические испытания проводились в режиме граничного трения в среде масел МС – 20 и И – 20. Для обоих масел результаты качественно совпадают, поэтому рассматриваются данные эксперимента лишь для одного из них – МС – 20.

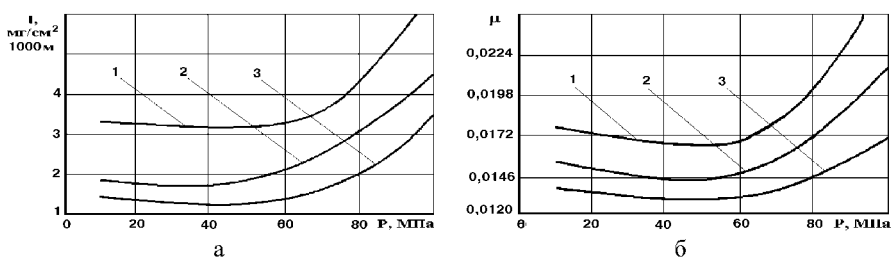


Рис. 2. Интенсивность изнашивания (а) и коэффициент трения (б) в зависимости от удельной нагрузки в среде масла МС – 20: 1 – закаленная сталь 45; 2 – ЭМН при комнатной температуре; 3 – ЭМН при подогреве до 250°C.

На рис. 2а представлены графики зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки для стали 45 без покрытия и после ЭМН. Хорошо известно, что интенсивность изнашивания пропорциональна выражению  $\left(\frac{P_c}{HB}\right)^v$ , где  $v > 1$ .

Так как  $HB_1 < HB_2$ , ( $I_1$ ) должно быть больше ( $I_2$ ), что и подтверждается кри-

выми 1 и 2. Однако, кривая 3, которая соответствует промежуточной твердости между 1 и 2, в таком случае должна располагаться между кривыми 1 и 2, в то время как в действительности ей соответствует наименьшее значение износа. Наблюдаемое расположение кривых объясняется низкой адгезионной прочностью покрытия, наплавленного на холодную подложку, что приводит к увеличению износа. В этом случае работает “правило градиента” И.В. Крагельского.

На рис. 2б представлены графики зависимости коэффициента трения ( $\mu$ ) от удельной нагрузки. Общий вид этих графиков, на которых просматривается слабо выраженный минимум, качественно коррелируется с зависимостью этих величин, описываемых формулой (9) [4]

$$\mu = \frac{2,1\tau_0}{\pi^{1/3} P_c^{1/3}} \frac{(1-\mu^2)^{2/3}}{E^{2/3}} \left( \frac{R}{h_{\max}} \right)^{1/3} + \beta + 0,35\pi^{1/3} \alpha_{\text{эф}} \left( \frac{h_{\max}}{R} \right)^{1/3} \left( \frac{P_c}{E} \right)^{1/3} (1-\mu^2)^{1/3} \quad (9)$$

где  $\alpha_{\text{эф}}$  – коэффициент гистерезисных потерь;

$\beta$  – коэффициент в уравнении  $\tau_{\text{п}} = \tau_0 + \beta P_{\text{г}}$ ;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$R$  – радиус кривизны неровности;

$h_{\max}$  – максимальная высота неровности;

$E$  – модуль Юнга;

$P_c$  – контурное давление;

$\tau_0$  – тангенциальная прочность связи между поверхностями трения.

Так как поверхностный слой обычно обладает антифрикционными свойствами, ( $\mu$ ) для стали 45 без покрытия (кривая 1) существенно больше, чем для этой же стали с наплавленным слоем. Минимальным коэффициентом гистерезисных потерь, величина которых пропорциональна величине производства энтропии (8), обладает слой, наплавленный на подогретую подложку (кривая 3), которому соответствует наименьшее для трех кривых значение коэффициента трения. В тоже время, сталь 45 без покрытия обладает большим коэффициентом сухого трения ( $\beta$ ), в связи с чем для нее наблюдаются более высокие значения ( $\mu$ ) (кривая 1), чем при наличии покрытия.

В уравнении (9) первый член соответствует деформационной составляющей трения, а третий – адгезионной, а поскольку адгезионная составляющая обычно превосходит деформационную, влияние третьего члена на общий вид зависимости  $\mu = f(P)$  больше, чем первого.

На рис.3а представлены графики зависимости интенсивности изнашивания от скорости скольжения. Хотя уменьшение износа с ростом скорости скольжения не является универсальной зависимостью между этими величинами, она весьма часто наблюдалась экспериментально [5] и обоснована теоретически [6]. Взаимное расположение кривых обусловлено теми же причинами, что и для рис.2а.

Эти же причины приводят и к взаимному расположению кривых зависимости  $\mu = f(v)$ , представленных на рис.3б. Уменьшение коэффициента трения с увеличением скорости скольжения также является известным фактом, одна-

ко в некоторых моделях уменьшение ( $\mu$ ) наступает после перехода через максимум в соответствии с формулой (10) [7]

$$F_{fr} = (a + bv)e^{-cv} + d, \quad (10)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – константы.

В трибоакустических моделях (например, [8]) коэффициент трения медленно и монотонно убывает с ростом скорости в интервале не слишком больших значений скорости.

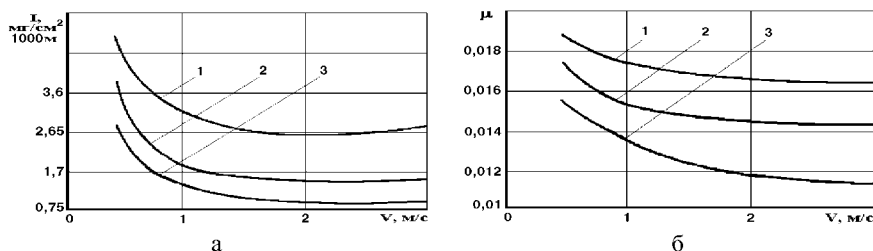


Рис. 3. Интенсивность изнашивания (а) и коэффициент трения (б) в зависимости от скорости скольжения в среде масла МС – 20: 1 – закаленная сталь 45; 2 – ЭМН при комнатной температуре; 3 – ЭМН при подогреве до 250°C.

**Выводы:** Получено уравнение, связывающее производство энтропии со скоростью охлаждения материала, в котором установлена квадратичная зависимость между этими величинами. Экспериментально установлено, что термоманнитная обработка материала приводит к улучшению его структуры. Обнаружено, что восстановление деталей методом ЭМН приводит к улучшению структуры и триботехнических свойств поверхности.

**Список литературы:** 1. Яцерицын П.И., Забавский М.Т., Кожуро Л.М. и др. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле. – Минск: Наука и техника, 1988. – 271 с. 2. Боровик Е.С., Мильнер А.С., Еременко В.В. Лекции по магнетизму. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1972. – 248 с. 3. Магнитные свойства металлов и сплавов / Ван-Флек Дж., Бин С., Де-Блуа Р. и др. / Под ред. С.В.Вонсовского. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 446 с. 4. Михин Н.М., Комбалов В.С. О зависимости коэффициента трения от нагрузки при упругом контакте в зоне насыщенного контакта // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Наука, 1971. – С. 146-153. 5. Боуден Ф.П., Тейлор Д. Трение и смазка твердых тел. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с. 6. Березняков А.И., Ветцель Е.С. О термодинамическом аспекте изнашивания трибосопряжений // Трение и износ. – 1991. – Т. 12, № 3. – С. 529-534. 7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с. 8. Березняков А. И. О взаимосвязи триботехнических процессов с особенностями распространения волн Стоунли в поглощающей среде // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 3. – С. 264-268.

Поступила в редколлегию 20.06.2003